Vermogensregeling

Regelen van elektrisch vermogen is een van de belangrijkste toepassingen van de elektronica. In dit artikel worden niet minder dan tien principes besproken waarmee u het vermogen dat u aan een belasting aanbiedt kunt regelen.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 21-05-2024

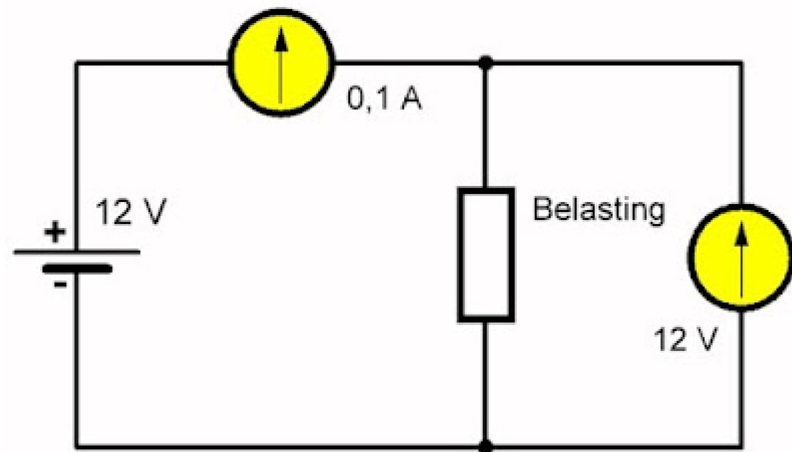
Achtergrond-informatie over vermogen

Wat is elektrisch vermogen?
Het elektrisch vermogen P is een maat voor de hoeveelheid elektrische energie die door een apparaat per tijdseenheid wordt verbruikt. Deze grootheid heeft als eenheid:
- de watt (W)
- de volt-ampère (VA)
- de volt-ampère reactief (VAR)

Welke eenheid van toepassing is hangt van het feit of u het vermogen meet in een gelijkstroom of wisselstroom systeem en of u met resistieve, capacitieve of inductieve belastingen te maken hebt.

Elektrisch vermogen in een gelijkstroom systeem
Bij systemen die met gelijkspanning worden gevoed is het vermogen ondubbelzinnig gedefinieerd. Het vermogen is gelijk aan het product van de spanning U die over de verbruiker staat en de stroom I die door die verbruiker vloeit.
In formule:
$P = U \cdot I$
waarbij:
- P het vermogen in watt is
- U de spanning in volt is
- I de stroom in ampère is

Als u dus, zoals in het onderstaand schemaatje getekend, een weerstand voedt uit een laboratoriumvoeding die u op 12 V hebt ingesteld en de ampèremeter geeft een stroomverbruik van 100 mA aan, dan neemt die weerstand een vermogen op van:
$P = 12\ V \cdot 0{,}1\ A$
$P = 1{,}2\ W$
In dit schema gaat men er van uit dat de voltmeter zo hoogohmig is dat de stroom die hij verbruikt volledig is te verwaarlozen. In de praktijk hebben de meeste multimeters een ingangsweerstand van 10 MΩ, die aanname is dus terecht.

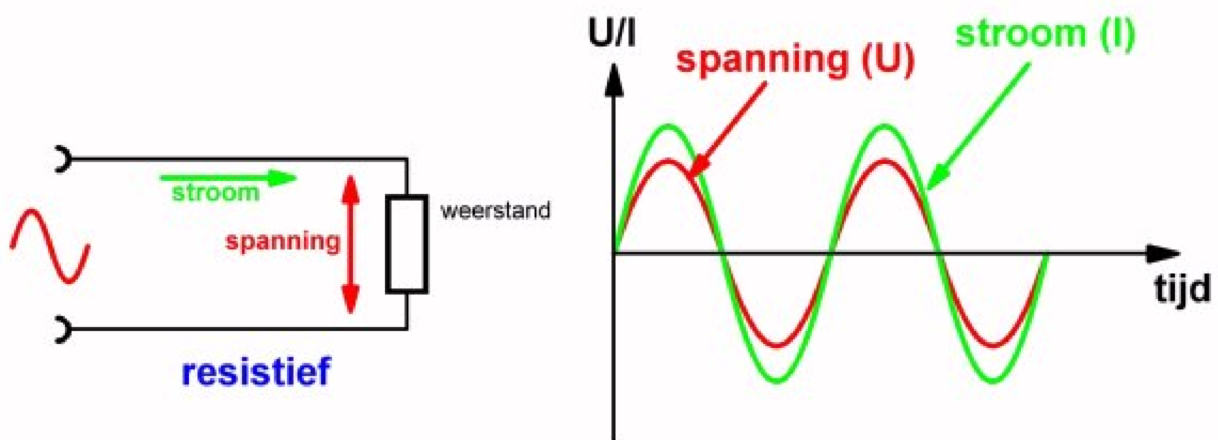


Berekenen van het vermogen in een gelijkstroom systeem.
(© 2024 Jos Verstraten)

Bij gelijkspanning zijn alle belastingen resistief
In gelijkstroom systemen ziet de voeding uitsluitend resistieve belastingen. Dat betekent dat die allemaal zuivere weerstanden zijn. Sluit u een spoel aan op een gelijkspanning, dan zal die voeding niet de inductantie (in henry) van de spoel zien, maar uitsluitend de lage inwendige weerstand (in ohm) van de draad waarmee de spoel is gewikkeld. Sluit u een condensator aan op een gelijkspanning, dan ziet het systeem niet de capaciteit (in farad) van dat onderdeel, maar uitsluitend de zeer hoge lekweerstand (in ohm).

Zuiver resistieve belastingen in wisselstroom systemen
Als u de gelijkspanningsvoeding in het bovenstaande schema vervangt door een trafo die secundair exact 12 $V_{effectief}$ levert, dan verandert er niets aan het opgenomen vermogen. Wisselspanning ziet zuivere weerstanden op precies dezelfde manier als gelijkspanning die ziet.

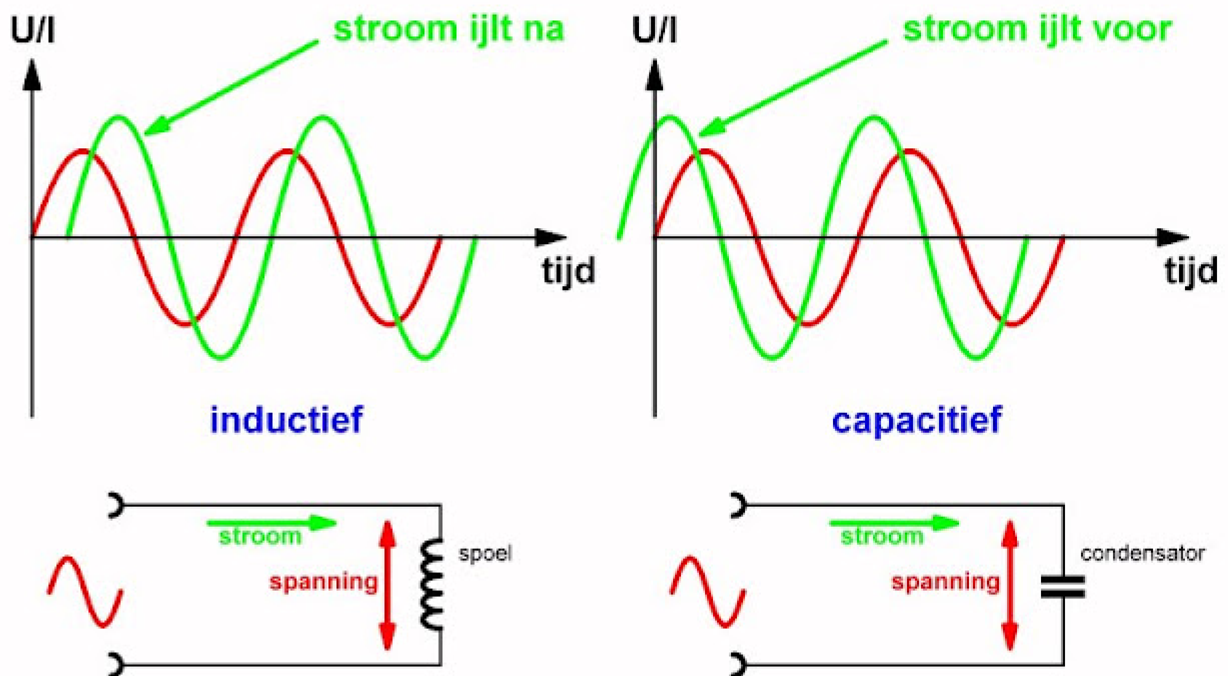
Geen faseverschuiving tussen spanning en stroom
In het geval van een zuiver resistieve belasting verlopen de wisselspanning over en de wisselstroom door de belasting volledig synchroon. Met zegt dat er geen faseverschuiving tussen spanning en stroom optreedt.



Wisselspanning en -stroom over en door een resistieve belasting.
(© 2024 Jos Verstraten)

Wisselspanning met capacitieve en inductieve belastingen
Heel anders wordt het verhaal als u een condensator of een spoel aansluit op een wisselspanning. Hoe vreemd het ook klinkt, de spanning en de stroom verlopen dan niet synchroon. Bij spoelen zal de stroom na-ijlen op de spanning: eerst bouwt zich spanning op over het component, pas daarna zal er stroom vloeien. Dit komt doordat de spoel als het ware elke toestandsverandering wil tegenwerken.

Bij een condensator gebeurt het omgekeerde, de stroom ijlt vóór op de spanning. De stroom moet immers de lading (en dus de spanning) over de condensator opbouwen en dat duurt even.
Met zegt dat er een faseverschil φ bestaat tussen de wisselspanning en de wisselstroom.



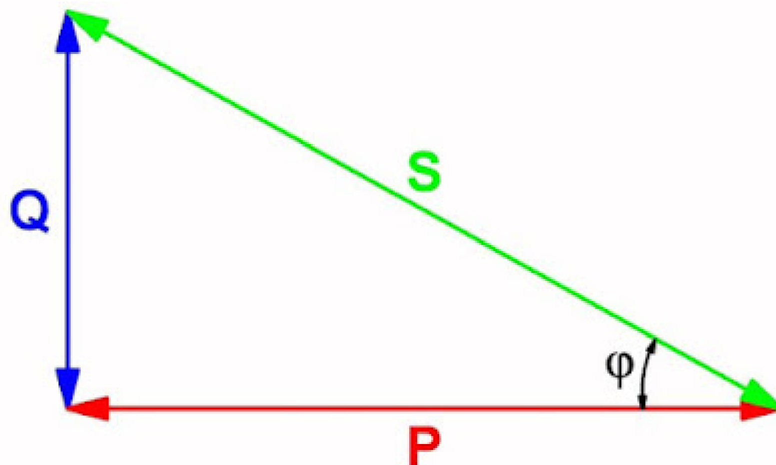
Wisselspanning en -stroom over en door een spoel of een condensator.
(© 2024 Jos Verstraten)

Het verschil tussen weerstand en impedantie
Vanwege dit faseverschil φ tussen spanning en stroom kunt u bij een condensator en een spoel niet spreken over een resistieve weerstand R bij het berekenen van het vermogen P. Men spreekt dan van de '*impedantie*'. De eenheid van impedantie is echter ook ohm (Ω), het symbool Z. De impedantie geeft het verband tussen de wisselspanning die u over het component aanlegt en de wisselstroom die als gevolg van deze actie door het component vloeit.
Voor weerstanden komt de impedantie Z altijd overeen met de gelijkstroom weerstand R. Deze weerstand is onafhankelijk van de frequentie van de spanning die u over de weerstand aanlegt.
Voor condensatoren en spoelen geldt dit echter absoluut niet. De impedantie van dit soort onderdelen is volledig afhankelijk van de frequentie van de spanning die u over het onderdeel aanlegt. Voor condensatoren is het zo dat de impedantie afneemt als de frequentie van de aangelegde spanning stijgt. Voor spoelen geldt dat de impedantie stijgt als de frequentie van de aangelegde spanning toeneemt.

Elektrisch vermogen in een wisselstroom systeem
Vanwege de faseverschil φ tussen spanning en stroom kunt u niet spreken over één soort wisselstroom vermogen. In wisselstroom systemen bestaat het totale verbruikte vermogen uit drie componenten:

- Het schijnbaar vermogen S:
  Het product van de effectieve waarden van spanning en stroom, gemeten in volt-ampère (VA).
- Het werkelijk vermogen P:
  Het vermogen dat daadwerkelijk nuttig werk verricht en gemeten wordt in watt (W).
- Het blindvermogen Q:
  Het deel van het vermogen dat geen nuttige energie levert, gemeten in volt-ampère reactief (VAR).

Het verband tussen deze drie vermogens kunt u grafisch voorstellen door drie lijnen, die een rechthoekige driehoek waarvan één hoek dus precies 90 graden is. Uit de stelling van pythagoras volgt het wiskundig verband tussen de drie vermogens:
$S^2 = P^2 + Q^2$



De beroemde vermogensdriehoek in wisselstroom systemen.
(© 2024 Jos Verstraten)

De vermogensfactor cos φ
Tussen de vermogens S en P is een scherpe hoek φ aanwezig. Spreek φ uit als '*phi*'. Zo'n hoek heeft een aantal grootheden, waaronder de sinus en de cosinus. Dat zijn dimensieloze cijfers die u uit tabellen kunt aflezen of kunt berekenen.
De cosinus van die hoek φ wordt de '*vermogensfactor*' genoemd en is een maat voor de efficiëntie waarmee een elektrisch systeem het schijnbare vermogen omzet in nuttig werk, dus in werkelijk vermogen. De vermogensfactor cos φ wordt wiskundig gedefinieerd als de verhouding tussen het werkelijke vermogen en het schijnbare vermogen in een wisselstroom installatie:
Vermogensfactor = $\cos \varphi = P / S$
Omdat het vermogen P altijd kleiner is dan het vermogen S (bekijk de driehoek!) is de vermogensfactor altijd een getal dat kleiner is dan een. Het gevolg hiervan is dat de wisselspanningsvoeding een grotere stroom moet leveren aan de belasting dan strikt noodzakelijk voor het overbrengen van het getransporteerde vermogen.
Die extra '*blindstroom*' wordt niet geregistreerd door de elektriciteitsmeter en u betaalt er dus niets voor. Om dit vermogensverlies te beperken worden door elektriciteitsleveranciers bepaalde eisen gesteld aan de minimale waarde van de cos φ. Heeft een bepaalde installatie een lagere waarde, dan moet die klant maatregelen treffen om de cos φ te verbeteren.

Het werkelijke vermogen P
Dit is gelijk aan het product van de effectieve (rms) waarden van spanning en stroom en de vermogensfactor cos φ:
$P = U_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \varphi$

Het blindvermogen Q
Het blindvermogen ontstaat als gevolg van de fasehoek tussen de spanning en de stroom. Het verricht geen nuttig werk. Het wordt gemeten in volt-ampère reactief (VAR) en speelt een belangrijke rol in systemen waar u vermogen moet regelen dat naar capacitieve of inductieve belastingen wordt gestuurd.
Het blindvermogen Q wordt wiskundig gedefinieerd met de formule:
$Q = U_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \sin \varphi$

Het schijnbaar vermogen S
Het schijnbaar vermogen kunt u opvatten als een maat voor de totale '*grootte*' van het vermogen dat door een belasting wordt verbruikt, bestaande uit zowel het werkelijke vermogen P als het blindvermogen Q. Het wordt aangeduid met de eenheid volt-ampère (VA).

De wiskundige uitdrukking van het schijnbaar vermogen is:
$S = U_{rms} \cdot I_{rms}$
Schijnbaar vermogen is van belang voor het dimensioneren van elektrische onderdelen zoals trafo's. Deze moeten immers in staat zijn het totale schijnbare vermogen aan een capacitieve of inductieve belasting te kunnen leveren. Vandaar dat u op een trafo het maximaal te leveren vermogen steeds zult aantreffen als een aantal VA en niet als een aantal W.

Het regelen van elektrisch vermogen

Inleiding
Het regelen van het elektrische vermogen heeft diverse toepassingen:

- Bij verwarmingselementen, zuiver resistieve belastingen, gebruikt u vermogensregeling om de hoeveelheid warmte die in het element wordt opgewekt, te regelen.
- Bij allerlei soorten lampen gebruikt u vermogensregeling om de intensiteit van het uitgestraalde licht te dimmen.
- Bij motoren, van groot tot klein, regelt u het toerental en het koppel van de motor door het opgenomen vermogen te regelen. Het koppel is een mechanische grootheid die een maat is voor de kracht die de motor ter beschikking heeft om de mechanische belasting aan het draaien te krijgen en draaiende te houden.

De verschillende technieken
U kunt elektrisch vermogen op verschillende manieren regelen, afhankelijk van het type belasting (resistief, inductief, capacitief), het soort voeding (gelijk- of wisselspanning) en de vereisten van de belasting:
- Voedingsspanningsregeling
- Weerstandsregeling
- Waterweerstand regeling
- Variac regeling
- LTC transformator regeling
- Pulsbreedte modulatie regeling
- Pakketbesturing
- Fase aansnij besturing
- Fase afsnij besturing
- Frequentie regeling

De voedingsspanningsregeling

Het principe
Bij dit principe voedt u de belasting niet met een constante gelijkspanning, maar met een instelbare. Als u de algemene formule van het vermogen voor de geest haalt ($P = U \cdot I$) wordt duidelijk dat P varieert als u U varieert. Bedenk echter wél dat door het variëren van de voedingsspanning ook de door de belasting opgenomen stroom varieert. Het is dus niet zo dat als u de voedingsspanning tot de helft reduceert het vermogen tot de helft wordt verlaagd.

Een voorbeeld
Stel dat u een verwarmingselement van een aquarium met een vermogen van 100 W en een voedingsspanning van 10 V op deze manier wilt regelen. Bij maximaal vermogen trekt dit element een stroom van 10 A uit de voeding. Immers:
$P = U \cdot I$
met als gevolg:
$I = P / U$

I = 100 W / 10 V
I = 10 A
Uit de wet van ohm:
U = I • R
volgt:
R = U / I
Dat verwarmingselement heeft dus een weerstand van:
R = 10 V / 10 A
R = 1 Ω
Stel nu dat u het vermogen wilt reduceren tot 50 W. Als u de voedingsspanning halveert tot 5 V gaat, alweer volgens de wet van ohm, de stroom dalen tot:
I = U / R
I = 5 V / 1 Ω
I = 5 A
Het element krijgt dan een vermogen toegevoerd van:
P = U • I
P = 5 V • 5 A
P = 25 W
Door het reduceren van de voedingsspanning tot de helft wordt het vermogen dus niet gehalveerd, maar gereduceerd tot 25 %!
Als u het vermogen wilt halveren tot 50 W moet u het element niet voeden met een spanning van 5 V, maar met een spanning van 7,07 V.
Immers, de opgenomen stroom wordt dan:
I = U / R
I = 7,07 V / 1 Ω
I = 7,07 A
Het opgenomen vermogen:
P = U • I
P = 7,07 V • 7,07 A
P = 49,98 W

De praktijk
Er worden zoveel instelbare voedingen in allerlei prijsklassen aangeboden dat voor iedere toepassing wel een geschikte voeding is te vinden waarmee u het vermogen of het toerental van uw gelijkstroom belasting kunt regelen. Voor dit soort toepassingen spelen eigenschappen als ruis, rimpelspanning, ingangs- en uitgangstabiliteit geen rol. Het heeft dus geen zin dure laboratoriumvoedingen aan te schaffen, de goedkoopste exemplaren zijn goed genoeg. De enige parameters die van belang zijn:

- de minimale uitgangsspanning
- de maximale uitgangsspanning
- de maximaal te leveren stroom

In de onderstaande foto ziet u een 3,0 V tot 12 V instelbare voeding die 2 A kan leveren. U betaalt er bij AliExpress ongeveer één tientje voor.



Een goedkope regelbare voeding uit China. (© AliExpress)

Ook veel grotere vermogens kunt u op deze manier regelen. In de onderstaande foto wordt de SK-1200-24 voorgesteld, een voeding die een instelbare spanning tussen 0 V en 24 V kan leveren bij een maximale stroom van 50 A. U betaalt er slechts ongeveer € 100,00 voor.

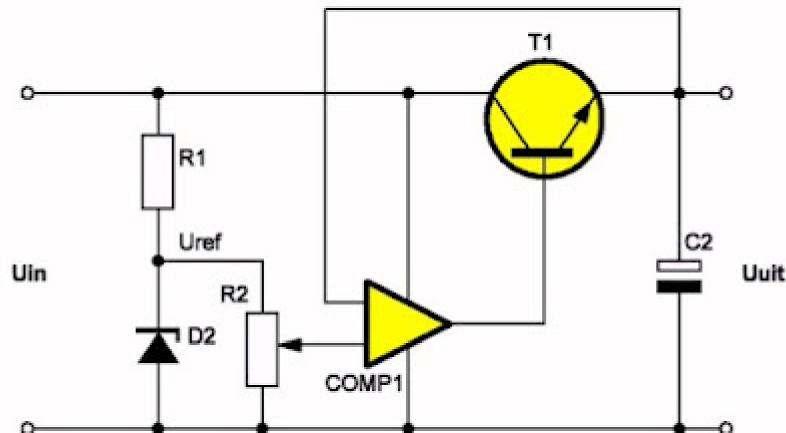


De SK-1200 levert 0 V tot 24 V bij 50 A. (© AliExpress)

Zelfbouw van lineaire regelingen

De voorgestelde Chinese apparaten werken volgens het principe van geschakelde voedingen. Het voordeel is dat er erg weinig vermogen verloren gaat in de voedingen zélf. Maar het is een principe waar zelfbouw uiterst moeilijk is en zelfs is af te raden. Lineair werkende instelbare gelijkspanningsvoedingen zijn echter een dankbaar object voor zelfbouw. Het principe van deze regeling is getekend in onderstaande figuur. Een vaste gelijkspanning U_{in} aan de ingang gaat via de regeltransistor T1 naar de uitgang U_{uit}. Uit de gelijkspanning op de ingang wordt via de weerstand R1 en de zenerdiode D2 een zeer stabiele referentiespanning U_{ref} afgeleid. Deze gaat naar de potentiometer R2, waarmee u de grootte van de uitgangsspanning U_{uit} kunt instellen. De uitgangsspanning U_{uit} wordt namelijk in de comparator COMP1 vergeleken met de door u ingestelde referentiespanning. De comparator COMP1 stuurt de regeltransistor T1 dusdanig, dat de uitgangsspanning van de

voeding gelijk wordt aan de door u ingestelde referentiespanning. Door het verdraaien van de loper van de potentiometer kunt u de uitgangsspanning instellen.
Dit in wezen zeer eenvoudige principe heeft één groot nadeel. In de regeltransistor T1 gaat heel wat vermogen verloren. Stel dat de ingangsspanning van de schakeling 35 V_{dc} bedraagt en u dat de uitgangsspanning instelt op 5 V_{dc}. Over dit onderdeel staat dan:
35 V_{dc} - 5 V_{dc} = 30 V_{dc}
Als de voeding een stroom van 5 A aan de belasting moet leveren, wordt in de regeltransistor een vermogen van niet minder dan 150 W opgewekt. Vermogen is immers het product van spanning maal stroom. Die 150 W vermogen uit zich onder de vorm van warmte, heel veel warmte. U moet de regeltransistor T1 dus op een forse koelplaat monteren, die de warmte moet afvoeren naar de omgevingslucht. Waarschijnlijk is het zelfs nodig om deze koelplaat te voorzien van een ventilator.



Het principeschema van een regelbare lineaire DC-voeding.
(© 2024 Jos Verstraten)

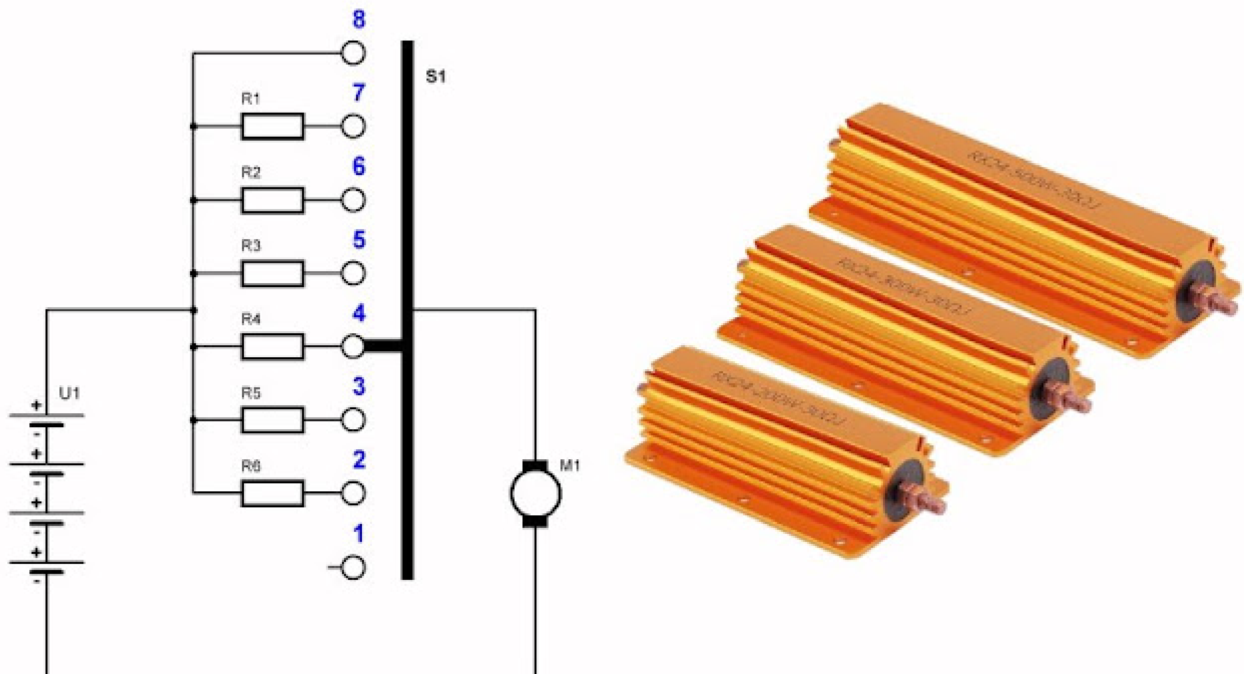
Voor- en nadelen
Het regelen van het vermogen van een gelijkstroombelasting door het variëren van de voedingsspanning werkt goed en is eenvoudig, maar de regeling is niet lineair. Als u bovendien een LED-lamp met dit principe wilt dimmen zult u merken dat de werking bij lage intensiteiten van de lamp niet vloeiend verloopt. Bij een bepaalde waarde van de voedingsspanning houdt de lamp opeens op met branden. U kunt dus de intensiteit niet netjes tot 0 % dimmen. Als u het toerental van een onbelaste gelijkstroom motor met dit principe wilt regelen zult u hetzelfde verschijnsel vaststellen. Bij verlaging van de spanning zal het toerental keurig afnemen, maar dan stopt de motor opeens. Ook het koppel dan een belaste motor kan leveren zal, bij verlaging van de voedingsspanning, opeens zoveel kleiner worden dat de motor niet voldoende kracht heeft om de belasting te laten draaien.

De weerstandsregeling

Het principe
Bij weerstandsregeling zet u een stel vaste weerstanden of een regelbare weerstand in serie met de belasting. Op deze manier wordt de totale weerstand verhoogd waardoor de stroom en de spanning door en over de belasting gaan dalen en dus ook het opgenomen vermogen. In het verleden werd weerstandsregeling veel gebruikt in elektrische locomotieven en trams, waar een reeks weerstanden werd in- en uitgeschakeld om de acceleratie en snelheid te regelen.

Regelen met vaste weerstanden
Het principe is getekend in de onderstaande figuur. Met de stappenschakelaar S1 wordt een bepaalde weerstand in serie met de belasting M1 opgenomen. In stand 1 is de motor uitgeschakeld. In stand 2 wordt weerstand R6 is serie met de motor geschakeld. Deze weerstand moet u zo kiezen dat de motor voldoende kracht krijgt om aan te lopen. De

standen 3 tot en met 7 schakelen een steeds kleiner wordende weerstand R5 tot en met R1 in serie met de motor. In stand 8 wordt de motor rechtstreeks met de voeding verbonden. Dergelijke vermogensweerstanden zijn beschikbaar met vermogens van 50 W tot 500 W en met waarden van 0,1 Ω tot 1 kΩ. De 100 W exemplaren kunt u kopen voor ongeveer € 2,00 per stuk, de 500 W modellen kosten ongeveer € 20,00 per stuk. U moet de weerstanden wél monteren op een koelprofiel.



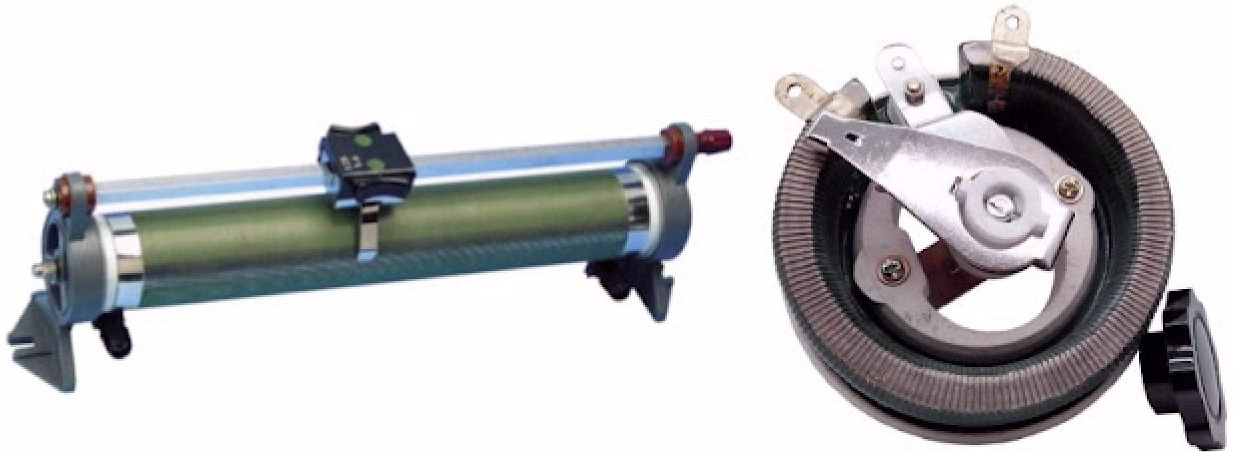
Vermogen regelen met vaste weerstanden. (© 2024 Jos Verstraten)

Op de onderstaande foto ziet u een dergelijk systeem dat ooit werd gebruikt voor het regelen van een zware industriemotor en dat nu tot ons industrieel erfgoed behoort.


Een schakelaar met weerstanden bank.
(© erfgoedinzicht.be)

Regelen met een reostaat

Een reostaat is een hoogvermogen regelbare draadgewonden weerstand. Die kunt u gebruiken in plaats van de resistieve stappenverzwakkers van de vorige figuren. Dergelijke draadgewonden regelbare weerstanden zijn beschikbaar tot vermogens van 500 W. Zij zijn beschikbaar als schuif- en als draaipotentiometer met waarden tussen 5 Ω en 1 kΩ. In de onderstaande foto ziet u rechts een 500 W exemplaar, te koop voor ongeveer € 60,00.



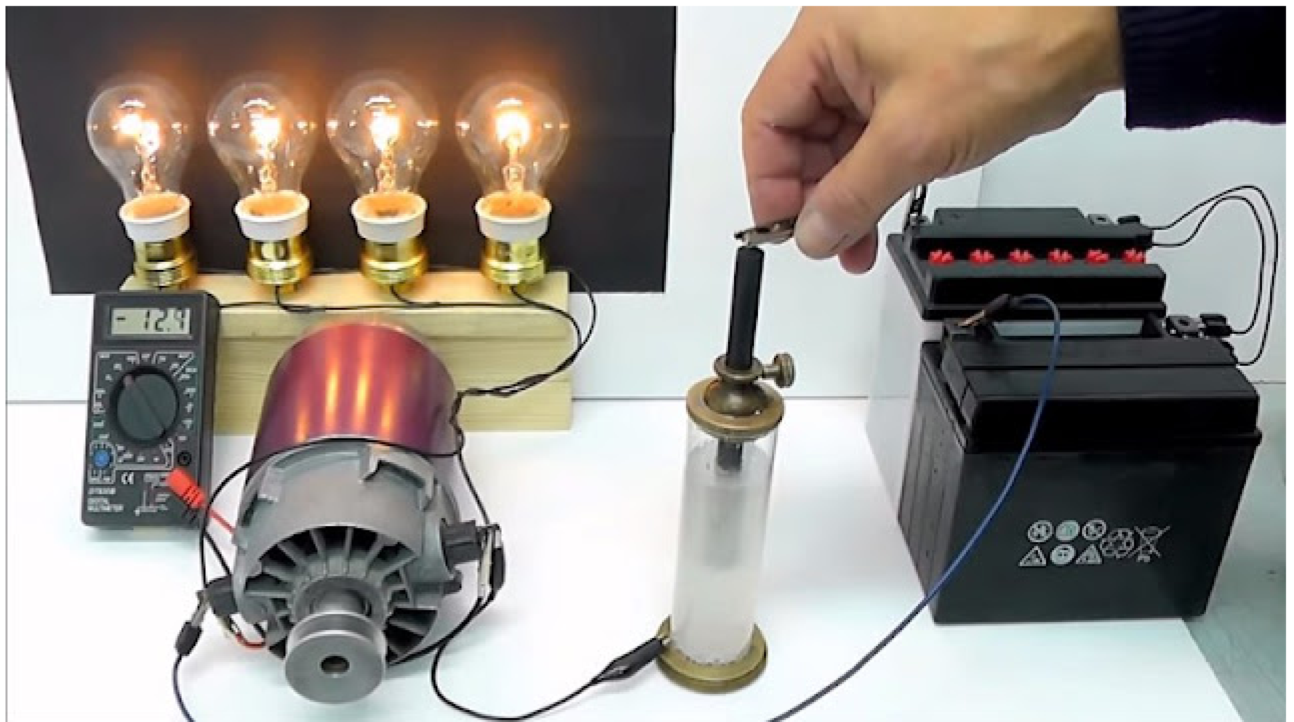
Vermogensregeling met reostaten. (© 2024 Jos Verstraten)

Voor- en nadelen
Het systeem is eenvoudig en goedkoop. Maar het is uiteraard alles behalve efficiënt omdat een heleboel energie verloren gaat onder de vorm van warmte in de voorschakelweerstand(en). Bovendien is de goede werking van de glijcontacten over de weerstandsdraad van een reostaat op de lange termijn onbetrouwbaar. Als hier overgangsweerstanden ontstaan kan de temperatuur plaatselijk zo erg stijgen dat het glijcontact wordt vastgelast aan de weerstandsdraad.

De waterweerstand regeling

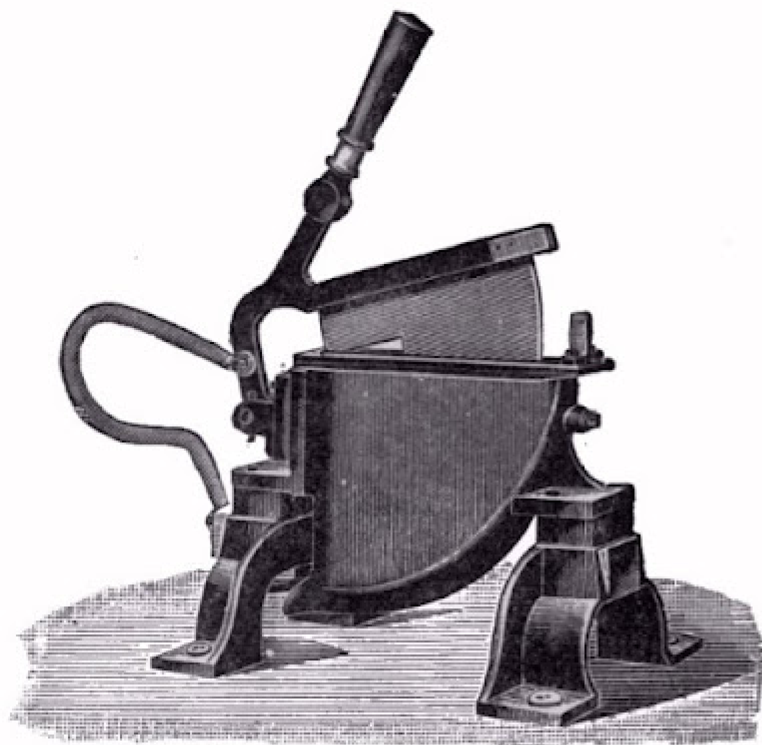
Het principe
Zuiver water H_2O heeft een vrij hoge elektrische weerstand. Dat verandert echter dramatisch als u een beetje zuur of zout aan het water toevoegt. Die toevoeging zorg ervoor dat onder invloed van een elektrische spanning tussen twee geleidende platen, ondergedompeld in het water, ionenstromen door de vloeistof gaan lopen. Vrije negatieve elektronen migreren naar de positieve plaat, positieve ionen naar de negatieve plaat. Die ionenstromen zorgen dus voor het vloeien van stroom door het water en volgens de wet van ohm kan dat uitsluitend als het water een bepaalde weerstand heeft. Die weerstand is niet alleen afhankelijk van de concentratie zuur of zout, maar ook van het oppervlak van de platen dat contact maakt met de vloeistof. Door de platen meer of minder in de vloeistof te laten zakken (of te draaien) krijgt u dus een soort van potentiometer die heel hoge vermogens kan verwerken.

Interessant voor experimenten met de jeugd
Dergelijke waterweerstanden zijn gemakkelijk zélf te maken en vormen een interessant object om proefjes mee te doen voor de jeugd. In de onderstaande foto ziet u hoe u met zo'n waterweerstand lampen kunt dimmen en een motor in snelheid kunt regelen.



Proefjes met een waterweerstand. (© ElectricExperimentsRobert33)

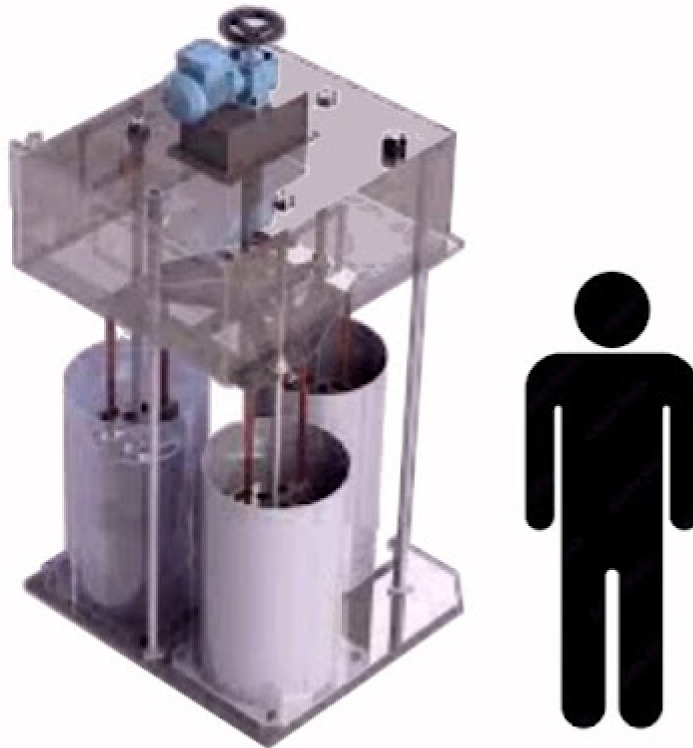
Nog in gebruik bij sommige kermis draaimolens
Dergelijke vermogensregelingen zijn al heel oud en stammen uit de begintijd van de elektrotechniek toen er nog geen goede constructietechnieken bestonden voor instelbare weerstanden. Zij werden toegepast voor het regelen van de intensiteit van theaterspot's en het schijnt dat er nog oeroude kermis draaimolens bestaan waarvan de snelheid met zo'n waterweerstand wordt geregeld. In de onderstaande figuur is zo'n met de hand te bedienen waterweerstand geschetst.



Een oeroude waterweerstand. (© 1916 Gresham Publishing)

Moderne uitvoeringen
Waterweerstanden worden echter nog steeds gefabriceerd en bijvoorbeeld toegepast voor het op vol vermogen testen van zware door dieselmotoren aangedreven noodgeneratoren. Bovendien staat bij iedere lijnwerkplaats van de NS in de buitenlucht een grote metalen bak

die dienst doet als waterweerstand en die wordt gebruikt als testbelasting voor de generatoren van gereviseerde dieselloc's.
Als voorbeeld van zo'n moderne waterweerstand ziet u op de onderstaande foto een model van het Italiaanse Gino-AKA. Om u een indruk te geven van de grootte van dit apparaat hebben wij er een pictogram van een mens naast gezet. Deze motorisch aangedreven waterweerstand kan niet minder dan 8 MW verwerken bij een maximale stroom van 2.200 A en een maximale spanning van 3.600 V. Als '*aanzuring*' van het water wordt een menging van Na_2CO_3 en K_2CO_3 gebruikt. De staafvormige elektroden zakken door middel van motor aandrijving meer of minder in de drie baden voor de drie fasen.

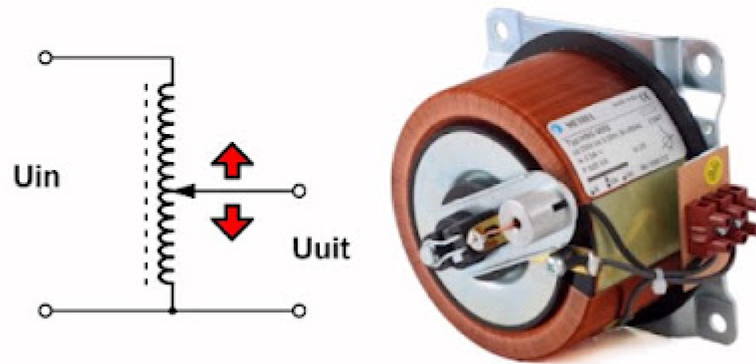


Een moderne waterweerstand van Gino-AKA. (© Gino-AKA)

Voor- en nadelen
Behalve voor experimentjes om de jeugd interesse voor elektrotechniek bij te brengen kunt u het principe van vermogensregeling door middel van waterweerstanden niet écht in de praktijk toepassen. In industriële omgevingen wordt het principe nog wél gebruikt voor het regelen van enorm hoge vermogens.

De variac regeling

Het principe
Dit principe is uitsluitend bij wisselstroom systemen te gebruiken. Hierbij wordt het vermogen geregeld door de waarde van de voedingsspanning te variëren met een regeltransformator. Een regeltransformator, meestal '*variac*' genoemd, bestaat uit een thorusvormige kern waarop één wikkeling is gewikkeld. Alle windingen van deze spoel liggen netjes naast elkaar. Aan de bovenzijde van de thorus is de isolatie van de wikkeldraad weggeslepen. Op dat punt wordt contact gemaakt met een rotor die op de as van de thoruskern zit en door middel van een loper elektrisch contact maakt met de windingen. De wikkeling wordt aangesloten op de netspanning, de uitgang tussen een van die netspanningsaansluitingen en de loper.



Principe en uitvoering van een variac. (© 2024 Jos Verstraten)

Oorsprong van het woord '*variac*'
'*Variac*' was een handelsnaam die rond 1930 werd geïntroduceerd door het bedrijf '*General Radio Company*'. Het is een samenvoeging van de Engelse woorden '***vari**able*' en '***a**lternating **c**urrent*'. Het verwijst dus naar de eigenschap van het apparaat om de uitgangsspanning van een wisselspanningsbron variabel te maken.

Leverbare vermogens
Variac's zijn leverbaar van lage vermogens van 150 VA voor gebruik in het meetlaboratorium tot meer dan 100 kVA voor het regelen van het vermogen dat naar wisselstroom motoren en elektrische ovens wordt gestuurd.



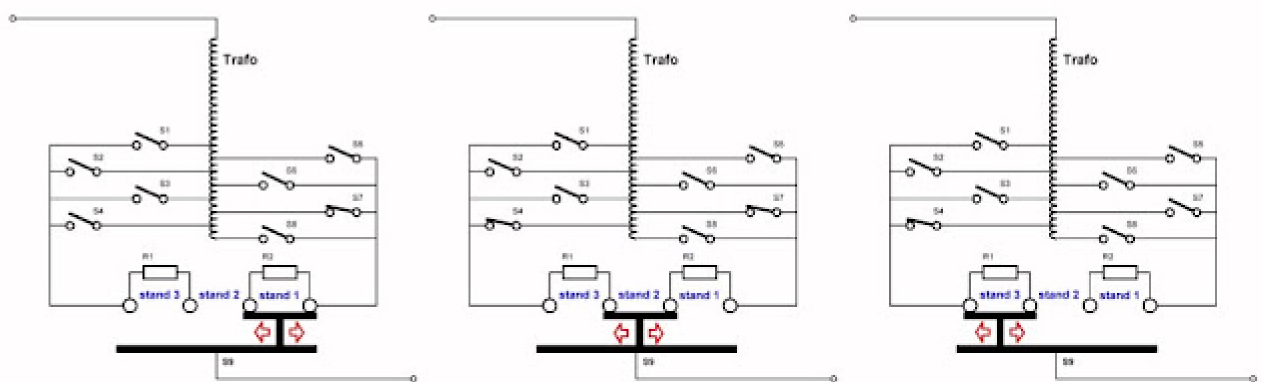
Diverse uitvoeringen van variac's. (© Yueqing Baoge Electric Co., Ltd.)

Voor- en nadelen
Het regelen van wisselspanningsvermogens met een variac gaat veel efficiënter dan regelen met weerstanden. Er gaat immers veel minder vermogen verloren. In de meeste gevallen is de loper zelfreinigend en zelfsmerend uitgevoerd, zodat de betrouwbaarheid van het sleepcontact op lange termijn is verzekerd.

De LTC transformator regeling

Het principe
'*LTC'* is het letterwoord van '***L**oad **T**ap **C**hanging*'. Het is een systeem dat niet is ontwikkeld voor het regelen van het vermogen over een breed gebied, maar voor het zo constant mogelijk houden van het vermogen dat een bepaalde verbruiker consumeert. Het is dus een speciale toepassing van vermogensregeling. Het systeem bestaat uit een speciale trafo met slechts één wikkeling met heel veel aftakkingen. Deze aftakkingen zijn zo op de wikkeling aangebracht dat er een spanningsverschil van maar een paar volt bestaat tussen twee naast elkaar liggende aftakkingen. Door middel van schakelaars kunt u steeds een andere aftakking van de trafo inschakelen zodat, als de ingangsspanning zou dalen, u deze daling kunt compenseren door een andere aftakking in te schakelen. Het slimme van het systeem is dat gedurende dat omschakelen de verbruiker niet zonder spanning komt te zitten.

Het schakelsysteem
In de onderstaande figuur ziet u hoe het '*Load Tap Changing*' principe werkt. Het gehele systeem is opgenomen tussen de voedingsspanning en de belasting. In het linker schema ziet u dat de belasting wordt gevoed vanaf de aftakking (tap) die door schakelaar S7 wordt ingeschakeld. Deze tap wordt via een speciale schakelaar S9 aan de belasting aangeboden. Deze schakelaar heeft vier contacten en een T-vormige loper dat het moedercontact in de drie mogelijke standen doorverbindt met twee van de vier contacten. Tussen de vier contacten staan twee identieke kleine weerstanden geschakeld, de waarde hiervan hangt af van het vermogen dat u moet regelen. In het linker schema wordt de tap die via S7 is geactiveerd via stand 1 van S9 doorgekoppeld naar de belasting.
Stel nu dat de voedingsspanning daalt waardoor het noodzakelijk is een hogere tap in te schakelen om het vermogen te handhaven. Wat er dan moet gebeuren is getekend in het middelste schema. De schakelaar S4 wordt ook gesloten en de schakelaar S9 wordt verplaatst naar stand 2. De spanning tussen de taps S4 en S7 gaat nu een flinke stroom door de twee identieke weerstanden R1 en R2 sturen. Het moedercontact van S9 komt nu dus op een iets hogere spanning te staan, spanning die ook over de belasting staat. Vervolgens wordt S9 in stand 3 gezet (rechter schema) en wordt S7 weer geopend. De twee weerstanden worden weer stroomloos en de belasting wordt nu gevoed uit de spanning die op de tap van S4 ter beschikking staat.
Moet de spanning nog meer worden verhoogd, dan wordt S8 gesloten en S9 weer in twee stappen van stand 3 naar stand 1 verplaatst. Moet de spanning vanuit tap S4 echter na een tijdje weer worden verlaagd, dan wordt S7 weer gesloten en gaat de belasting in twee stappen weer terug naar de spanning die op de tap van S7 ter beschikking staat.



Het schakelschema van een LTC transformator regeling. (© 2024 Jos Verstraten)

De pulsbreedte modulatie regeling

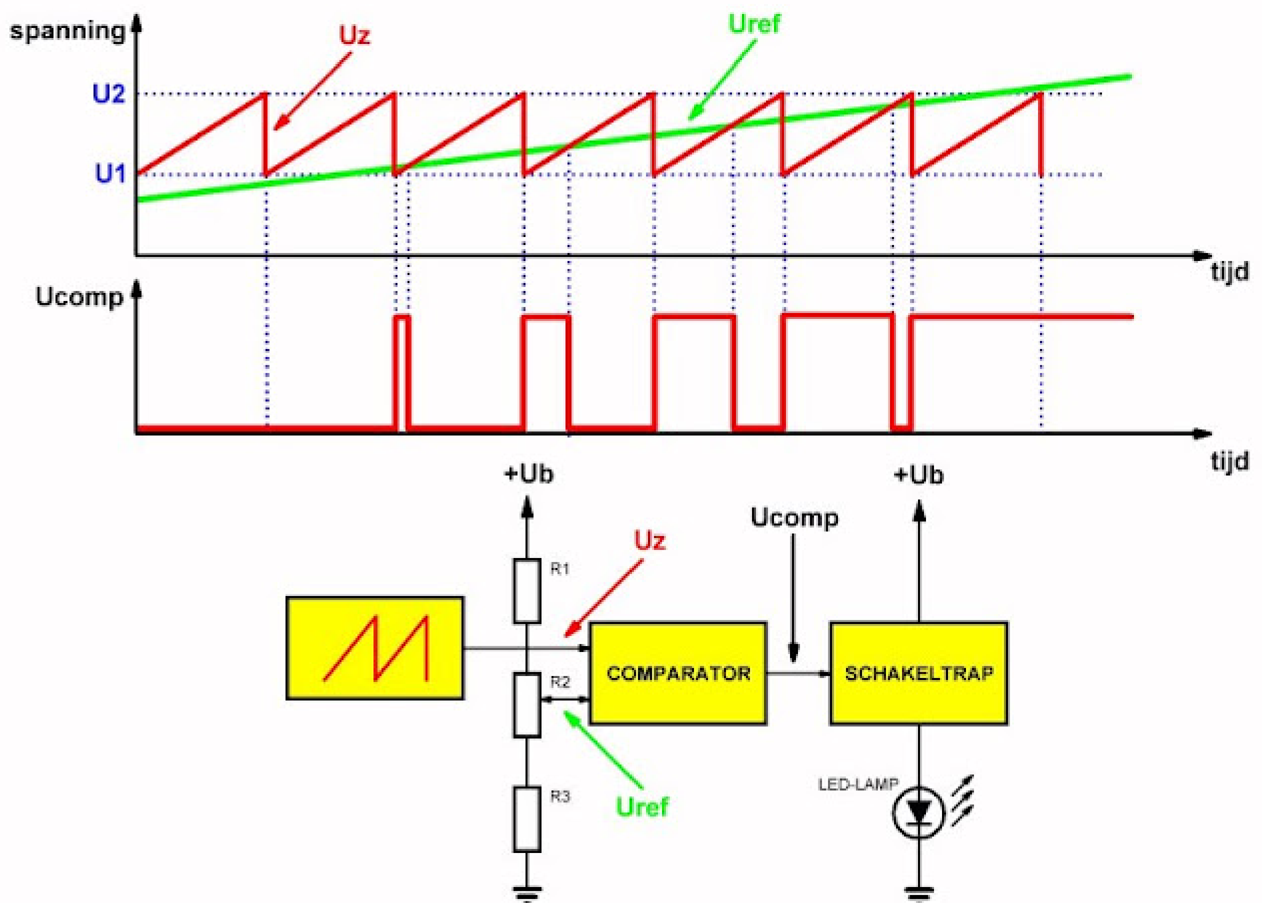
Het principe
Pulsbreedte modulatie, in het Engels '***P**ulse **W**idth **M**odulation*' (PWM) genoemd, zorgt ervoor dat u het vermogen van een gelijkspanningsbelasting uiterst efficiënt kunt regelen. Bij PWM

wordt niet de grootte van de spanning, maar de aan/uit-verhouding (pulsbreedte of duty cycle) geregeld. Als u aan de ingang een gelijkspanning van 12 V aanlegt, zal deze spanning ook aan de uitgang verschijnen. De spanning is echter niet continu aanwezig maar wordt als het ware heel snel in stukjes gehakt, oftewel gepulst. Dit '*in stukjes hakken*' gebeurt 300 tot 600 keer per seconde. Hoe breder deze pulsjes, hoe hoger de gemiddelde waarde van de spanning op de uitgang. Door de breedte van deze spanningspulsjes te regelen, kunt u dus ook het uitgangsvermogen regelen.
Het gevolg is dat de stroom die de belasting verbruikt gedurende de puls altijd maximaal zal zijn. Immers, de spanning op de uitgang is gedurende de puls ook maximaal. U kunt dit principe dus ook gebruiken voor het dimmen van 12 V LED-lampen en voor het met maximaal koppel regelen van het toerental van 12 V of 24 V gelijkspanningsmotoren.



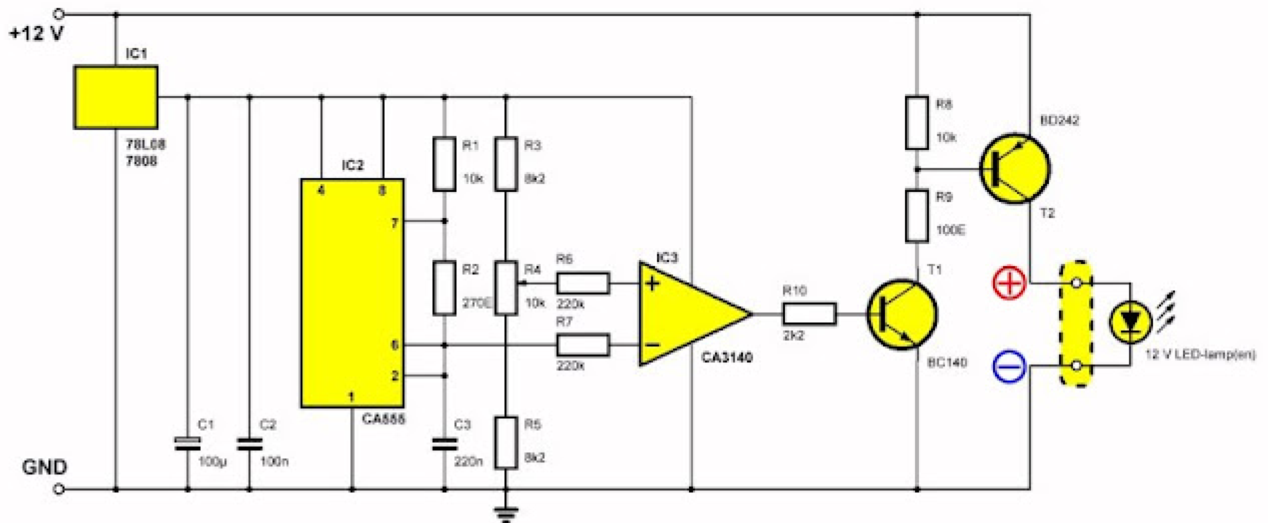
Het principe van pulsbreedte modulatie. (© 2024 Jos Verstraten)

Een blokschematische benadering
Er zijn diverse systemen ontwikkeld om het PWM principe om te zetten in een praktische schakeling. In de onderstaande figuur ziet één van die principes, dat zich uitstekend leent voor zelfbouw.
Een zaagtandgenerator wekt een zaagtand U_z op die oscilleert tussen de grenzen U_1 en U_2. De uitgangsspanning U_{comp} wordt in een comparator vergeleken met een instelbare gelijkspanning U_{ref}. De grenzen van deze gelijkspanning zijn zo gekozen dat de minimale waarde iets kleiner is dan U_1 en de maximale waarde iets groter dan U_2.
Als U_{ref} kleiner is dan U_1 zal de uitgang U_{comp} van de comparator 'L' zijn. De schakeltrap wordt niet gestuurd, de LED-lamp ontvangt geen spanning. Naarmate U_{ref} groter wordt zal de breedte van de uitgangspuls van de comparator toenemen. De schakeltrap wordt gedurende een groter deel van de zaagtand periode open gestuurd, de gemiddelde stroom door de LED-lamp (is de belasting) stijgt. Als U_{ref} groter wordt dan U_2 levert de comparator continu een hoge spanning aan de schakeltrap. De LED-lamp wordt gevoed uit de volle 12 V voedingsspanning en brandt op maximale intensiteit.



Het blokschema van een van de vele PWM-technieken. (© 2024 Jos Verstraten)

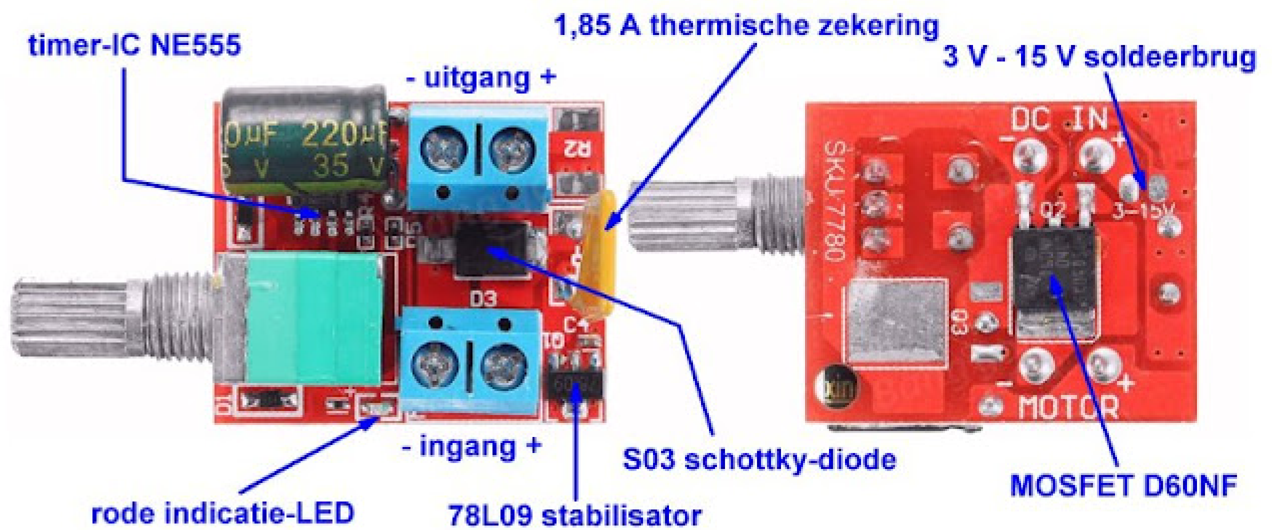
Een eenvoudige voorbeeldschakeling
In het onderstaand praktische schema ziet u een uitwerking van het geschetste blokschema. Voor de zaagtandgenerator wordt gebruik gemaakt van de bekende timer 555. De timer wordt geschakeld als astabiele multivibrator. De 555 is intern samengesteld uit twee comparatoren, een uit drie even grote weerstanden samengestelde spanningsdeler, een flip-flop en een transistor. De twee comparatoren zijn ieder met één ingang verbonden op een knooppunt van de interne spanningsdeler. De twee vrije ingangen, beschikbaar op de pennen 2 en 6, worden gezamenlijk verbonden met de externe condensator C3. Deze condensator wordt uit de voedingsspanning opgeladen via twee in serie geschakelde weerstanden R1 en R2. De collector van de interne ontlaadtransistor (pen 7) is verbonden met het knooppunt van beide externe weerstanden.
Bij het inschakelen van de voeding $+U_b$ is de condensator C1 volledig ontladen. De uitgang van de onderste comparator is 'H', die van de bovenste comparator 'L'. De condensator C3 gaat opladen via de twee weerstanden. Op het moment dat de condensatorspanning gelijk wordt aan 1/3 van $+U_b$ slaat de onderste comparator in de 555 om. Dit heeft geen gevolgen voor de status van de interne flip-flop. Even later wordt de condensatorspanning gelijk aan 2/3 van $+U_b$. De uitgang van de bovenste comparator wordt 'H', de flip-flop wordt gereset en de Q-niet uitgang wordt 'H'. De interne transistor T1 gaat geleiden en ontlaadt condensator C3 via de (kleine) weerstand R2. Als de spanning over de condensator gelijk wordt aan 1/3 van $+U_b$ wordt de uitgang van de onderste comparator weer 'H'. De flip-flop set, Q-niet wordt 'L', de transistor spert en de condensator kan weer gaan opladen.
Over de condensator C3 ontstaat dus een zaagtand die oscilleert tussen de grenzen 1/3 van $+U_b$ en 2/3 van $+U_b$. Precies het soort signaal dat nodig is voor de pulsbreedte regeling!



Een zelfbouw vermogensregeling volgens het PWM principe. (© 2024 Jos Verstraten)

De spanning U_{ref} wordt opgewekt door middel van de potentiometer R4, opgenomen in een spanningsdeler R3, R4 en R5. De waarde van de voorschakelweerstanden (8,2 kΩ) is zo gekozen ten opzichte van de waarde van de potentiometer (10 kΩ) dat op de loper een spanning tussen iets minder dan 1/3 van $+U_b$ en iets meer dan 2/3 van $+U_b$ ter beschikking staat. Net zoals het volgens het blokschema moet wezen, dus!
De schakeltrap is samengesteld uit een PNP-vermogentransistor T2 van het type BD242 en een BC140 (T1), die de basis van T2 naar de massa trekt als de uitgang van de comparator positief wordt. Transistor T2 wordt dan via de grote basisstroom volledig in verzadiging gestuurd.

De ZS-X4B, een PWM vermogensregelaar printje
Door het Chinese '*Excellway*' wordt onder de code ZS-X4B voor ongeveer € 3,50 een printje aangeboden waarmee u een vermogen van maximaal 90 W kunt regelen bij een maximale spanning van 35 V_{dc}. Zoek via Google naar '*35V Motor PWM Speed Controller*' en u vindt vast een paar aanbieders. In de onderstaande foto ziet u beide zijden van dit printje, dat maar 30 mm x 25 mm x 20 mm groot is.
De instelbare pulsbreedte wordt gerealiseerd met een NE555 timer-IC. Nu heeft dit IC een maximale voedingsspanning van 18 V. Vandaar dat op het printje een stabilisator van het type 78L09 aanwezig is die de voeding voor de chip binnen veilige grenzen houdt. Omdat de belasting in veel gevallen heel erg inductief is, bijvoorbeeld bij het aansturen van DC-motoren, moet men maatregelen treffen om de door de spoelen gegenereerde hoge spanningen bij het uitschakelen van de stroom te elimineren. Vandaar een schottky-diode die over de uitgang is geschakeld en deze spanningen kortsluit. Als MOSFET wordt een D60NF van STMicroelectronics toegepast. Deze kan een adembenemende 80 A verwerken en heeft een AAN-weerstand van slechts 0,008 Ω. Het printje werkt met een schakelfrequentie van 10 kHz typisch.



Beide zijden van het ZS-X4B printje van het Chinese 'Excellway'. (© 2024 Jos Verstraten)

De Kemo modules M171 en M195
De M171 en M195 van het bekende Duitse '*Kemo Electronic*' zijn pulsbreedte vermogensregelingen voor gelijkspanningen tot 28 V_{dc}. De modules kosten € 29,99 (M171) en € 46,99 (M195). Het verschil is de maximale stroom die de modules kunnen leveren:
- M171: 5 A ongekoeld, 10 A gekoeld
- M195: 5 A ongekoeld, 20 A gekoeld

Aan de ingang kunt u een gelijkspanning tussen 9 V_{dc} en 28 V_{dc} aanleggen. Zoals uit onderstaande foto blijkt, worden beide modules geleverd in een behuizing die is voorzien van een aluminium koelflens. Deze flens moet bij de meeste toepassingen op een koelplaat worden geschroefd en mag nooit warmer worden dan 70 °C. Met de bijgeleverde potentiometer van 4,7 kΩ kunt u de gemiddelde waarde van de uitgangsspanning regelen tussen vrijwel 0 % en vrijwel 100 % van de waarde van de ingangsspanning.

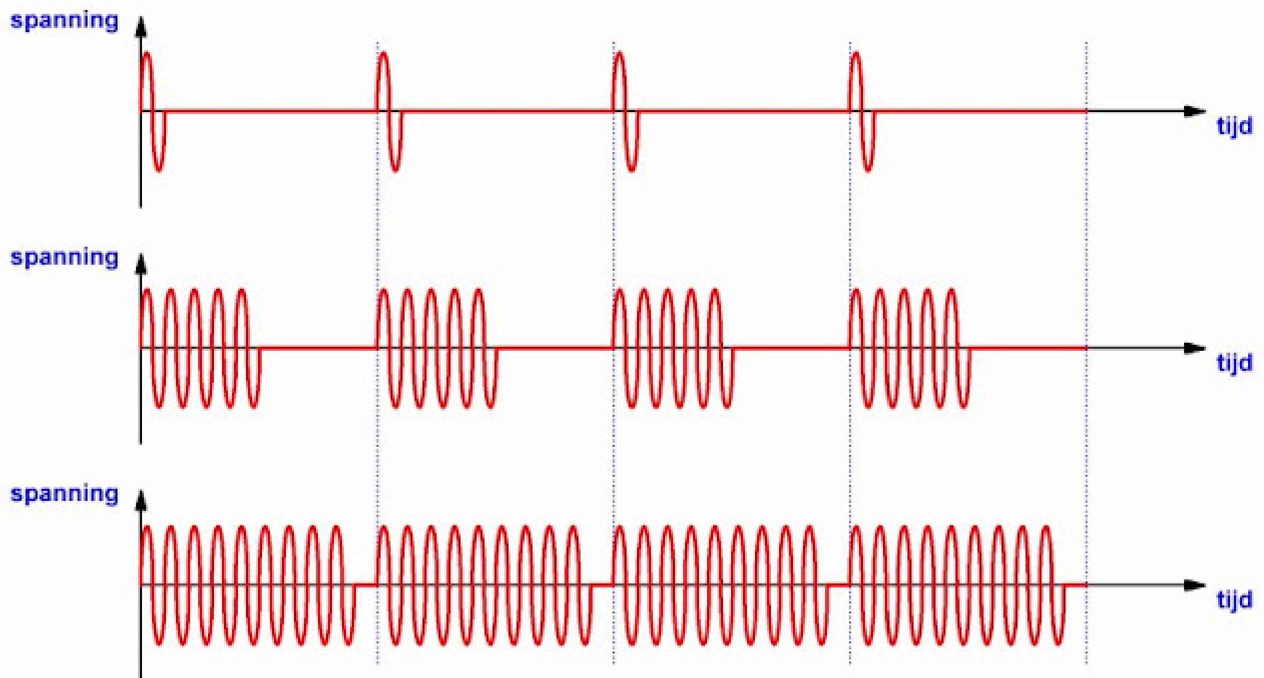


De Kemo modules M171 en M195. (© Kemo Electronic)

Voor- en nadelen van PWM
Het grote voordeel van deze techniek is dat er bijzonder weinig vermogen verloren gaat in de regelschakeling. Tussen de in- en de uitgang staat immers alleen de elektronische schakelaar. Tegenwoordig kunt u daar een MOSFET voor gebruiken, een onderdeel dat gekarakteriseerd wordt door een uiterst lage inwendige weerstand in de geleidende toestand. Een tweede voordeel van PWM is dat het de enige goedkope manier is om LED-lampen over een groot bereik te dimmen. De LED's gaan immers branden tijdens de AAN-fase en doven tijdens de UIT-fase. Als de schakelsnelheid hoog genoeg is ziet u niets van dat geflikker maar zien uw ogen de gemiddelde intensiteit.
Het nadeel is dat door de snelle schakeling van hoge stromen elektromagnetische interferentie (EMI) kan ontstaan.

De pakketbesturing

Het principe
Bij dit principe, dat u uitsluitend bij 50 Hz wisselstroom systemen kunt toepassen, wordt het vermogen geregeld door variatie van het aantal perioden van de netspanning dat tot de verbruiker wordt toegelaten. De perioden van de netspanning worden in groepen ingedeeld, bijvoorbeeld tien perioden per groep. Moet u de belasting op vol vermogen sturen, dan worden alle tien perioden van de groep aan de verbruiker aangeboden. Mag het wat minder, dan worden negen perioden doorgelaten en één gesperd. In de laagste stand van de regelaar wordt van elke tien achtereenvolgende perioden er slechts één doorgelaten. Het zal u wel niet verbazen dat dit principe pakketregeling wordt genoemd. De netspanning wordt immers in keurige pakketjes aan de belasting aangeboden.



Het principe van pakketbesturing. (© 2024 Jos Verstraten)

In het Engels
In het Engels wordt dit principe '*full-wave duty-cycle power control*' genoemd.

De M204 module van Kemo
Het zélf ontwerpen van een pakketbesturing is geen eenvoudige zaak. Gelukkig komt het Duitse '*Kemo Electronic*' ons weer ter hulp met de M204 module. Met deze module, die € 49,95 kost, kunt u maximaal 16 A schakelen. Dat komt bij 230 V dus neer op een maximaal vermogen van ongeveer 3.500 W.
De M204 wordt, in tegenstelling tot de meeste Kemo-modules, geleverd in een stevige metalen behuizing voorzien van koelribben. De module heeft vier faston-stekkers voor het aansluiten van de 230 V netspanning en de belasting. Het aantal perioden dat in een groep wordt doorgekoppeld naar de belasting kunt u instellen met een potentiometer die bedraad aan de module wordt geleverd. De repetitietijd bedraagt ongeveer 0,8 Hz, waaruit u kunt afleiden dat er in één groep ongeveer 40 perioden van de netspanning zitten.

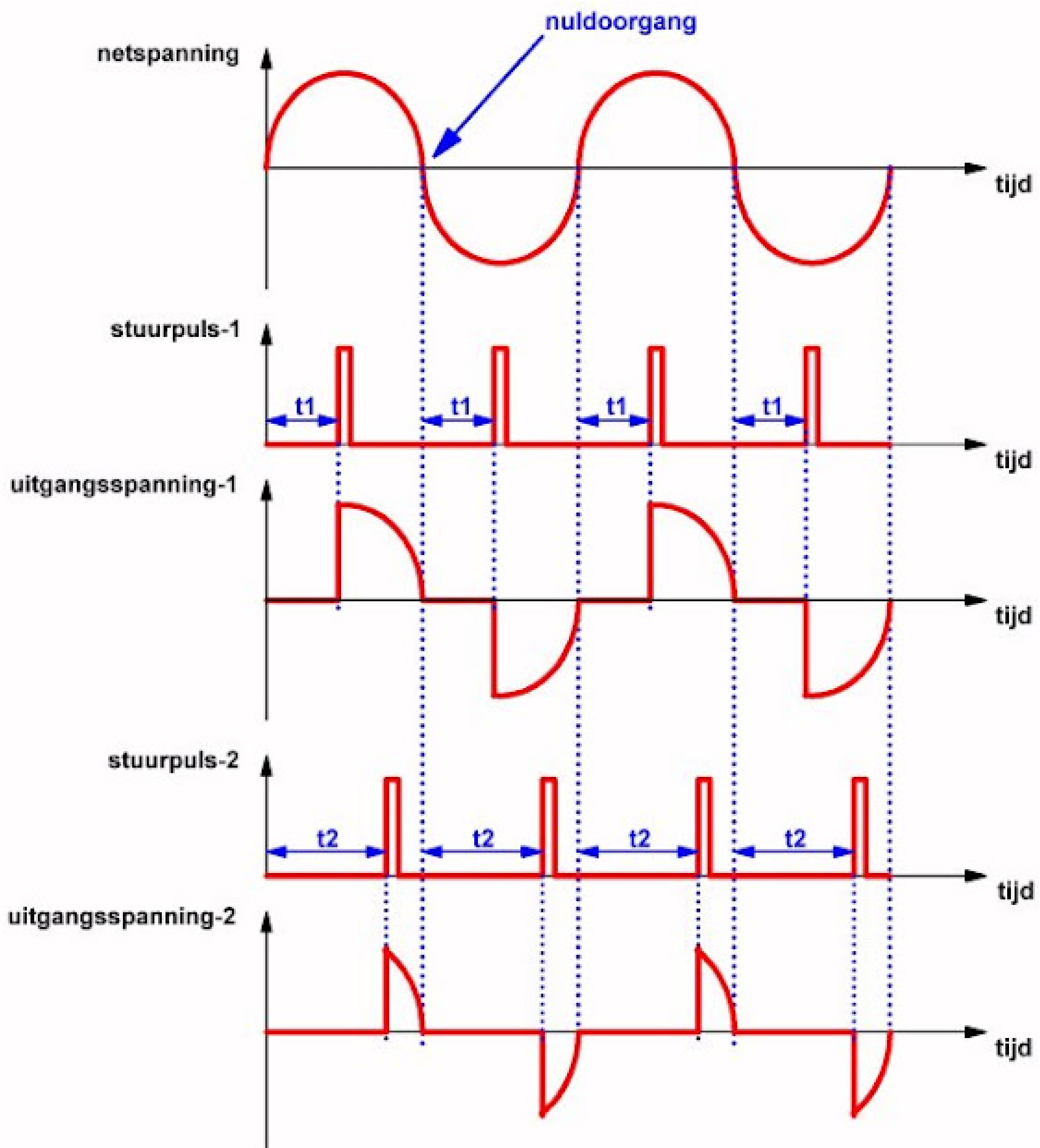


De M204 module van Kemo. (© Kemo Electronic)

Voor- en nadelen
Het grote voordeel van pakketbesturing ligt voor de hand. De spanning over de belasting blijft sinusvormig verlopen, zodat ook de stroom sinusvormig is. Plotselinge stroompieken worden vermeden. Het in- en uitschakelen van de verbruiker gebeurt telkens bij het begin en einde van een periode, dus op het ogenblik dat de momentele waarde van de netspanning nul is. Er ontstaan absoluut geen hogere harmonischen in het systeem, de schakeling stoort niet.
Het grote nadeel van dit systeem is echter dat het alleen bruikbaar is met belastingen die op een elektrische manier warmte produceren en waar het wegvallen van volledige perioden van de netspanning geen nadelige gevolgen heeft. U kunt er dus iedere elektrische verwarming mee sturen, zoals straalkacheltjes zonder ventilator, ouderwetse kookplaten die op 230 V werken en die geen standenschakelaar hebben, verwarmingen voor allerlei chemische baden, bakovens, etc. Met dit principe kunt u echter géén lampen of motoren aansturen!

De fase aansnij besturing

Het principe
Dit is het principe dat werd toegepast in de goedkope snoerdimmers waarmee u vroeger het vermogen en dus de intensiteit van gloeilampen kon regelen. Hoewel dit principe tegenwoordig wordt vervangen door fase afsnij besturingen is het tóch nog zo algemeen in gebruik dat een bespreking zonder meer op zijn plaats is.
Het principe wordt grafisch toegelicht aan de hand van de grafieken in de onderstaande figuur. In de bovenste grafiek zijn twee perioden van de netspanning getekend. In de tweede en derde grafiek is getekend wat er gebeurt als een elektronische schakelaar een tijdsduur t_1 na de nuldoorgang van de sinus even wordt gesloten. Het eerste deel van de halve sinus wordt geblokkeerd, slechts dat deel van de halve periode na moment t_1 wordt doorgekoppeld naar de belasting. Als u de schakelaar later in de periode sluit, bijvoorbeeld op moment t_2 in de onderste grafieken, dan zal een nog kleiner deel van de halve periode aan de belasting worden aangeboden.



Het principe van fase aansnij besturing. (© 2024 Jos Verstraten)

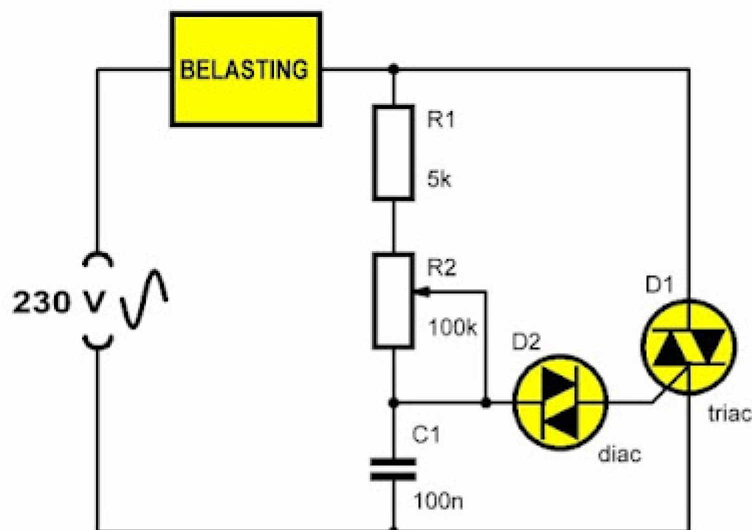
In het Engels
Fase aansnij besturing wordt in het Engels '*leading edge dimming*' genoemd.

Een thyristor of triac als schakelaar
Op deze manier kunt u het vermogen dat de netspanning kan opwekken in de belasting heel soepel regelen tussen nul en de maximale waarde. Belangrijke voorwaarde is uiteraard wél dat de schakelaar weer geopend wordt vóór de volgende nuldoorgang van de spanning.
Een thyristor of triac is een ideale elektronische schakelaar voor deze toepassing. Als u over dat onderdeel een spanning aanlegt, zal het onderdeel sperren en dus als het ware een geopende schakelaar vormen. Zet u echter een smal pulsje op de gate, dan zal het onderdeel ontsteken en in deze toestand blijven. Het onderdeel is dan te vergelijken met een gesloten schakelaar met een zeer kleine inwendige weerstand.
Vanwege de fysische eigenschap dat de halfgeleider uit zichzelf naar sper gaat als de stroom onder de houdwaarde daalt, hoeft u geen maatregelen te treffen om het onderdeel precies op de nuldoorgang van de sinus naar sper te sturen. Bij de nuldoorgang is de netspanning immers even nul en zal er ook geen stroom door de kring vloeien. De stroom door de thyristor of triac valt dus onder de houdwaarde en het onderdeel dooft vanzelf.
Het enige dat u moet doen om een universeel bruikbare vermogensregeling te ontwerpen is een schakeling verzinnen die smalle pulsjes genereert die gesynchroniseerd zijn met de nuldoorgang van de sinus en waarvan u het verschijningsmoment continu kunt verschuiven

over de volledige halve periode van de netspanning. Hiervoor zijn diverse praktische oplossingen verzonnen, van zeer eenvoudige tot zeer ingewikkelde.

De eenvoudigste schakeling

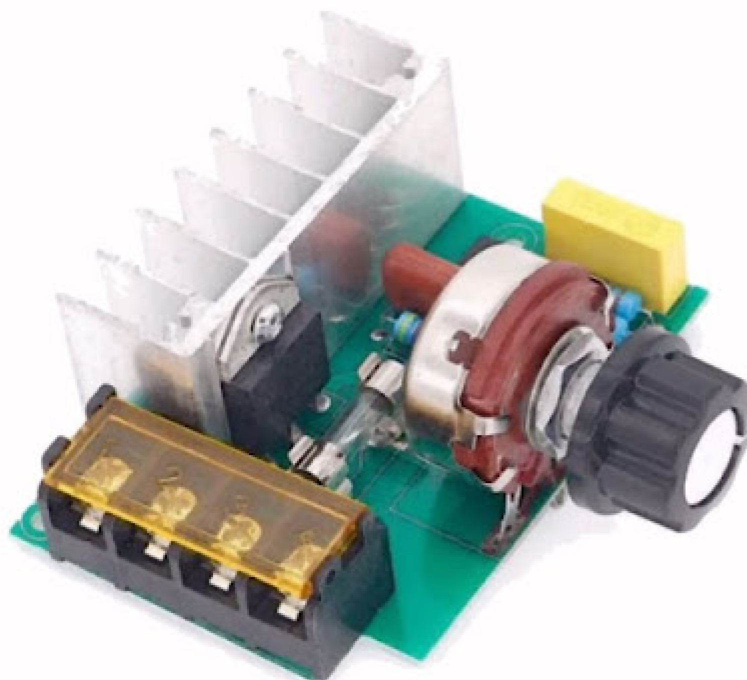
De eenvoudigste schakeling die het principe van de fase aansnij besturing in de praktijk brengt, is getekend in de onderstaande figuur. Stel dat bij het inschakelen de netspanning begint met een positief gerichte halve sinus. De triac D1 is gesperd en via de belasting stijgt de spanning op de MT2 van dit onderdeel. Tegelijkertijd gaat er via R1 en R2 een stroom lopen die de condensator C1 begint op te laden.
Op een bepaald moment is de condensatorspanning zo ver gestegen dat de diac D2 doorslaat en gaat geleiden. Er gaat een zo grote stroom naar de gate van de triac lopen dat het onderdeel ontsteekt. De positieve sinushelft op de MT2 van de triac is dan al gedeeltelijk voorbij. Stelt u de potentiometer R2 bijvoorbeeld op zijn middelste stand in, dan is de positieve sinushelft al half voorbij voordat de triac gaat geleiden. De belasting krijgt ook slechts stroom gedurende de helft van de positieve sinushelft en krijgt weinig vermogen toegevoerd.
Bij de nuldoorgang van de netspanning daalt de stroom door de triac tot nul, met andere woorden het onderdeel spert.
Stelt u R2 op minimale weerstand in, dan is C1 zeer snel opgeladen en zal helemaal in het begin van de sinushelft de triac laten ontsteken. Bij maximale weerstand van R2 wordt de oplading van C1 zodanig vertraagd dat het onderdeel pas op het allerlaatste stukje van de sinushelft ontsteekt, de belasting krijgt minimaal vermogen.
Bij de daaropvolgende negatieve halve sinus herhaalt het proces zich, maar nu wordt de condensator C1 uiteraard negatief opgeladen. Voor de diac en triac maakt dit echter niets uit, die werken ook met negatieve spanningen.



De eenvoudigste schakeling met een triac. (© 2024 Jos Verstraten)

Goedkope printjes uit China

Fase aansnij besturing printjes zijn te kust en te keur te koop via AliExpress. Als voorbeeld ziet u op de onderstaande foto een printje waarmee u 1 kVA ~ 230 V_{ac} vermogen kunt regelen. Als schakelaar wordt een BTA1600B toegepast. Het printje heeft als afmetingen 85 mm bij 55 mm bij 35 mm en wordt aangeboden voor € 2,18.



Een kant-en-klaar dimmer printje voor 1 kVA. (© AliExpress)

De Kemo M028N power control
Voor € 27,06 levert '*Kemo Electronic*' een triac fase aansnij besturing module met wat extra's. Met deze M028N module, die toepasselijk niet dimmer wordt genoemd maar '*power control*', kunt u het vermogen dat aan zware 230 V belastingen wordt aangeboden traploos regelen. Zonder koeling kan de module een vermogen van 1.350 VA aan. Gemonteerd op een flinke koelplaat kan de module niet minder dan 4.000 VA de baas. De M028N heeft nog meer unieke eigenschappen in petto. De module wordt standaard geleverd met een potentiometer, maar met een extra module uit de Kemo-stal kunt u de module ook aansturen met een gelijkspanning of met in breedte regelbare TTL-pulsen.

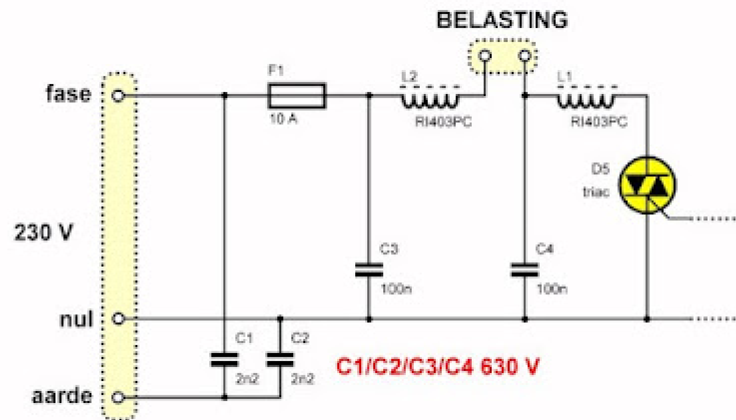


De 4 kVA module van Kemo Electronic. (© Kemo Electronic)

Wat u kunt regelen met fase aansnij besturingen en wat niet
Met dit principe regelt u het vermogen dat u naar gloeilampen, halogeenlampen, verwarmingselementen, collector- en polaire motoren stuurt. Wat u niet mag aansluiten zijn TL-balken, kwartslampen, spaarlampen, sommige LED-lampen en motoren met aan aanloopcondensator.

Ontstoren bij fase aansnij besturing absoluut noodzakelijk
In vermogensregelingen die werken met fase aansnij besturing ontstaan per definitie grote, snel opkomende stromen. De steile voorflanken van deze stroompulsen bevatten vele hogere harmonischen zodat u in de schakeling, die in principe maar op 50 Hz werkt, toch heel wat hoge frequenties kunt aantreffen! Die hoogfrequente signalen vloeien voornamelijk door de

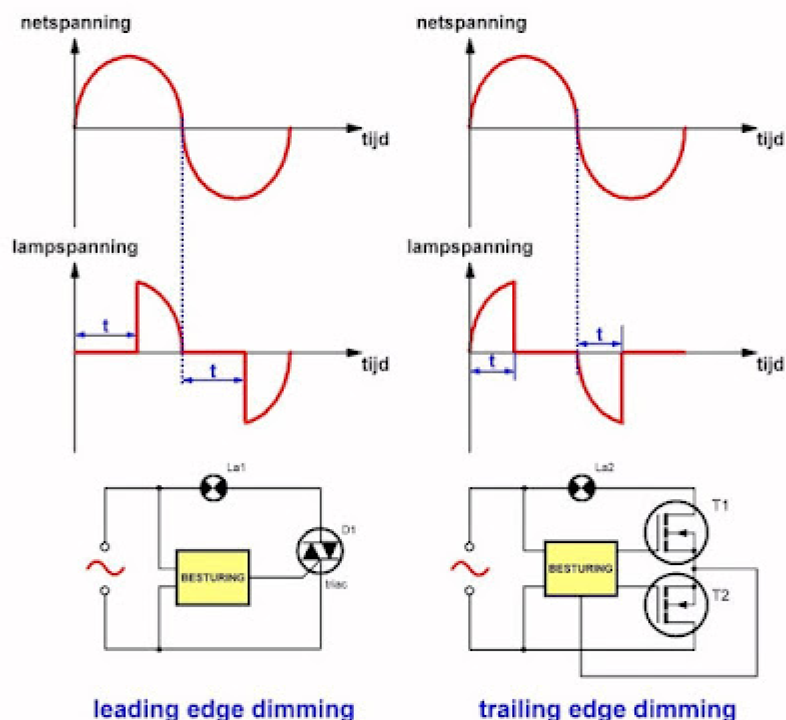
verbindingsdraden tussen de triac en de belasting. In de praktijk zijn die vaak tientallen meter lang, zodat deze draden werkelijk uitstekende zendantennes zijn en de hoogfrequente elektromagnetische golven rijkelijk over de omgeving uitsproeien.
In de onderstaande figuur ziet u een aantal onderdelen dat niets te maken heeft met de werking van de triac, maar alles met het zo goed mogelijk onderdrukken van deze hoogfrequentie stoorsignalen: L1, L2, C1, C2, C3 en C4. Deze LC-netwerken vormen laagdoorlaat filters die de hoogfrequente stoorsignalen met tientallen dB's onderdrukken en de 50 Hz van het net zo goed als ongestoord doorlaten.
Zes dure componenten voor de ontstoring? Niet iets teveel van het goede? Nee, absoluut niet! Het bekende systeem dat u in goedkope dimmertjes aantreft en dat bestaat uit één condensatortje en één klein ringvormig ontstoorspoeltje is écht niet voldoende.



Een professioneel uitgevoerde ontstoring van een triac-dimmer.
(© 2024 Jos Verstraten)

De fase afsnij besturing

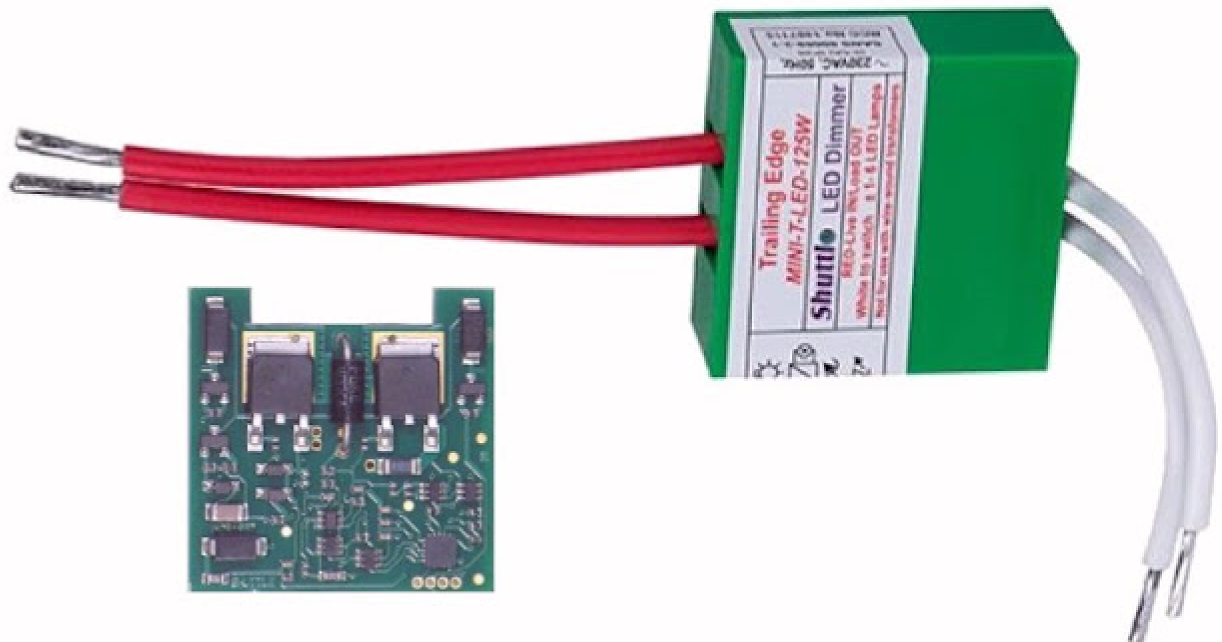
Het principe
Toen 230 V_{ac} LED-lampen op de markt verschenen bleek dat de elektronica in die lampen niet goed kon samenwerken met de traditionele fase aansnij dimmers. Het dimmen van zo'n lamp lukte of helemaal niet, of met horten en stoten. Er werd gezocht naar een oplossing voor dit probleem en deze oplossing bleek de fase afsnij besturing te zijn. In de onderstaande figuur ziet u het verschil tussen fase aansnij en fase afsnij besturing. Bij fase afsnij besturing wordt de belasting ingeschakeld op het moment dat de wisselspanning door de nul gaat. Op het gewenste moment wordt de verbinding tussen de belasting en de wisselspanning onderbroken. Dat gaat nu echter niet meer met een triac, maar met MOSFET's. Omdat een MOSFET volledig anders wordt aangestuurd dan een triac is de noodzakelijke besturingsschakeling veel uitgebreider.



Fase aansnij en fase afsnij besturing vergeleken.
(© 2024 Jos Verstraten)

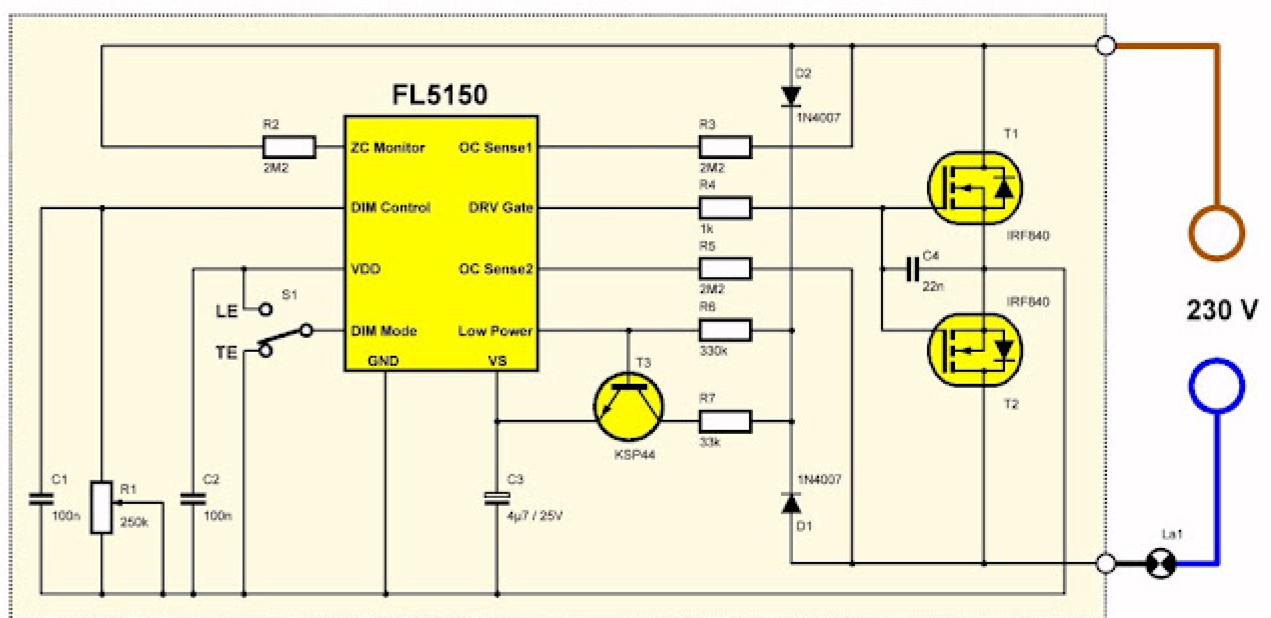
In het Engels
Fase afsnij besturing wordt in het Engels '*trailing edge dimming*' genoemd.

De MINI-T-LED-125W, een fase afsnij dimmer module
Het zélf ontwerpen van een fase afsnij dimmer is heel wat ingewikkelder dan het bouwen van een traditionele triac-dimmer. Vandaar dat wij aanbevelen gebruik te maken van kant-en-klare modules die nu door diverse fabrikanten worden aangeboden. Een van de bekendste en goedkoopste is de MINI-T-LED-125W, die u bij diverse postorder bedrijven voor ongeveer € 20,00 kunt kopen. Deze module is ontworpen door het Zuid-afrikaanse '*Shuttle Lighting Control Systems*' en u kunt er LED-lampen van 2 W tot 125 W probleemloos mee dimmen. U kun er ook inductieve belastingen tussen 10 VA en 125 VA mee regelen. De dimmer zit in een kleine groene kunststof behuizing met als afmetingen 36 mm bij 36 mm bij 12 mm en weegt slechts 16 gram. Aan een kant ontspruiten twee stevige rode draden en aan de andere kant twee witte draden. De rode worden opgenomen in de fasedraad die naar de lamp gaat. De twee witte draden worden aangesloten op een of meerdere drukknoppen waarmee u de module kunt bedienen.
Op de onderstaande foto ziet u wat er allemaal op de print zit. De twee MOSFET's zijn prominent aanwezig. Uit het groot aantal onderdelen kunt u afleiden dat het inderdaad niet simpel is om zo'n schakeling zelf te ontwerpen.



De MINI-T-LED-125W van de binnen- en buitenkant. (© 2024 Jos Verstraten)

Zelfbouw met een FL5150 van Fairchild
Als u tóch de uitdaging aan wilt gaan om zélf een trailing edge dimmer te ontwerpen raden wij u aan gebruik te maken van een FL5150 chip van Fairchild. Dit IC is goed leverbaar voor een paar euro's en u kunt er zowel trailing edge als leading edge dimmers mee ontwerpen. Het gaat in het kader van dit overzicht artikel te ver om dit IC tot in de details te bespreken. Er is voldoende informatie over deze chip op internet te vinden. In de onderstaande figuur geven wij wél het standaard schema dat door de fabrikant wordt aangeraden. Dan weet u in ieder geval wat u te wachten staat!

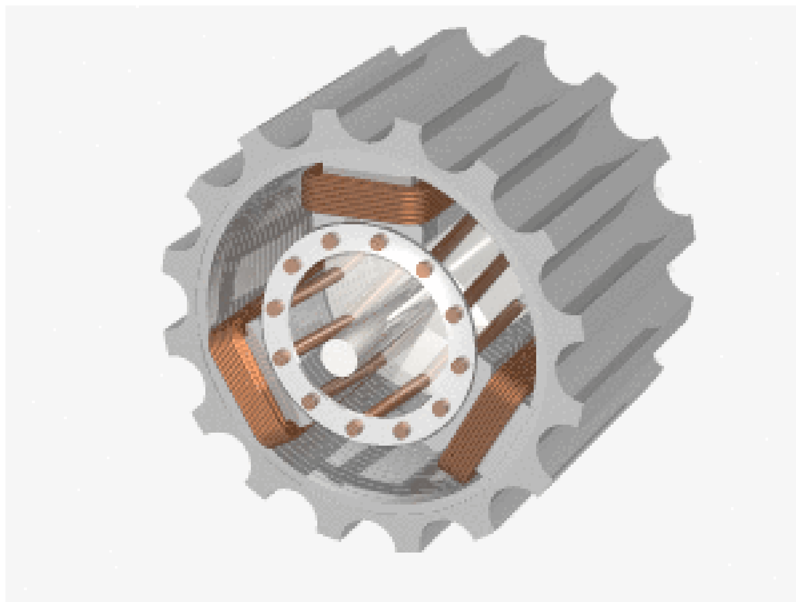


Het standaard schema rond de FL5150 van Fairchild. (© 2024 Jos Verstraten)

Ontstoring
Bij trailing edge dimmers ontstaan snelle en grote stroomsprongen die veel hoge harmonischen bevatten. Ook bij dit principe moet u dus uitgebreide maatregelen treffen tegen het rond strooien van elektromagnetische interferentie. Kortom, goed ontstoren!

De frequentie regeling

Eerst even iets over elektrische motoren
Hoewel u er in uw hobby praktijk nauwelijks mee te maken zult krijgen is frequentie regeling een in de industrie heel vaak toegepast principe waarmee het toerental en het vermogen van elektromotoren wordt geregeld. Om het principe te begrijpen moet u echter eerst wat basale kennis verzamelen over de werking van elektromotoren.
Bepaalde typen elektromotoren, de zogenaamde inductiemotoren, hebben een toerental dat volledig wordt bepaald door de frequentie van de voedingsspanning. In het kort komt het er op neer dat zich rond de stator (het niet bewegend deel van de motor) drie spoelen bevinden waar men wisselspanningen op aansluit die 120° in fase verschoven zijn. U kunt hiervoor de drie fasen L1, L2 en L3 van krachtstroom gebruiken. Hierdoor ontstaat in de luchtspleet tussen de stator en de rotor een zogenaamd magnetisch draaiveld.
Op de rotor (het draaiend deel van de motor) zijn meerdere kortgesloten spoelen of staven aangebracht. Het draaiveld wekt in die spoelen of staven stromen op die weer magnetische velden veroorzaken. De magnetische velden van de stator- en rotorwikkelingen reageren op elkaar met afstoting en aantrekking. Het gevolg is dat de rotor gaat draaien met een iets lagere snelheid dan het draaiveld van de rotor. Dat noemt men het slip-verschijnsel. De snelheid waarmee het draaiveld rond draait is uiteraard afhankelijk van de frequentie van de drie voedingsspanningen.



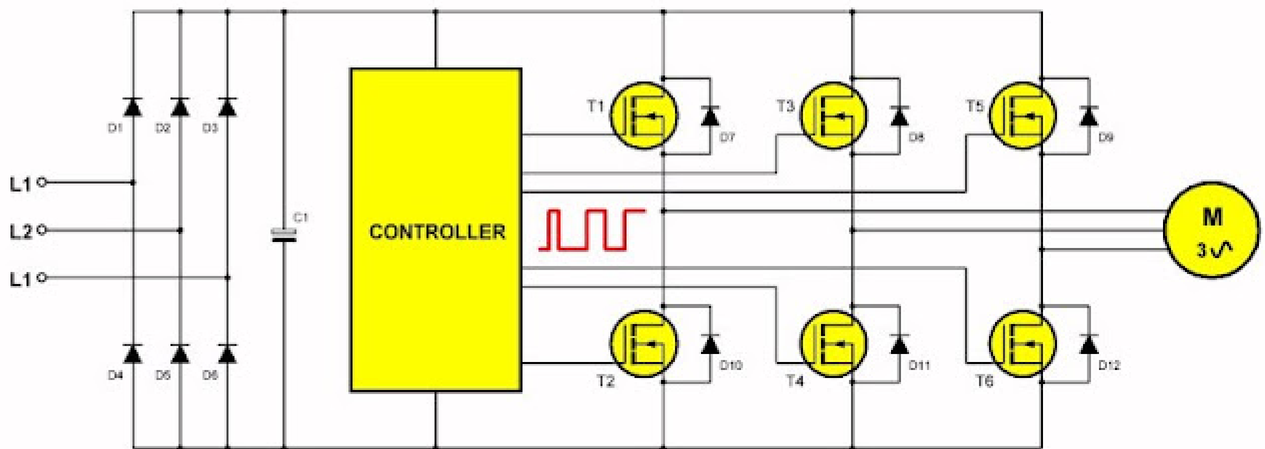
Voorstelling van de draaiende rotor in het draaiveld.
(© 2006 Mtodorov_69)

Het principe
Na deze super-snelcursus '*werking van de inductiemotor*' wordt het principe van de frequentie regeling snel duidelijk. Een frequentie regeling voedt de drie stator wikkelingen van een inductiemotor met drie op een sinus lijkende spanningen die 120° in fase verschoven zijn, maar waarvan de frequentie regelbaar is. Als het toerental of het vermogen van de motor laag moeten zijn, stelt men de frequentie regelaar in op een veel lagere frequentie dan de 50 Hz van het net. Moet de motor op een hoog toerental draaien en veel vermogen leveren, dan stelt men de frequentie van de frequentie regelaar in op een hoge waarde. De meeste frequentie regelaars bestrijken het gebied van 0 Hz tot 400 Hz, waarbij de waarde is in te stellen met een resolutie van 0,1 Hz. Behalve de frequentie moet men ook de grootte van de spanningen regelen om bij alle toerentallen een voldoend groot koppel te handhaven.

Het blokschema van een frequentie regelaar
In het onderstaand schema is het blokschema van een dergelijke vermogensregelaar voorgesteld. De drie fasen L1, L2 en L3 van het net worden eerst gelijkgericht (D1 ~ D6) en door middel van een condensator C1 omgezet in een gelijkspanning. In de '*CONTROLLER*' zit een microprocessor bestuurde schakeling die de stuursignalen genereert voor zes stuks MOSFET's (T1 ~ T6). De gelijkspanning van de voeding wordt omgezet in drie op een sinus

lijkende spanningen met een instelbare frequentie en 120° faseverschuiving. Deze sturen de drie-fasen motor M.

In wezen werkt dit systeem op dezelfde manier als de omvormers van zonnepanelen. De sinusvormen worden benaderd door middel van PWM technieken. De MOSFET's leveren drie pulstreinen waarvan de aan/uit-verhouding zo is gecodeerd dat de gemiddelde waarde van de signalen ongeveer sinusvormig verloopt. Met deze drie spanningen worden de drie statorspoelen van de motor gestuurd.



Het blokschema van een frequentie regelaar. (© 2024 Jos Verstraten)